

Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften

2021 | Factsheet

Klimawandel: Ursachen, Folgen und Handlungsmöglichkeiten



VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

Impressum

Herausgeber
Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V.
– Nationale Akademie der Wissenschaften –
Jägerberg 1, 06108 Halle (Saale)

Redaktion
Dr. Christian Anton, Johannes Mengel, Dr. Elke Witt
Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina
Kontakt: politikberatung@leopoldina.org

Grafiken
Erfurth Kluger Infografik GbR, Berlin

Satz
Klötzner Company, Hamburg

DOI
https://doi.org/10.26164/leopoldina_03_00327

Lizenz
Texte und Grafiken stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY-ND 4.0

Titelfoto
Shutterstock

Zitiervorschlag
Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina (2021): Klimawandel: Ursachen, Folgen und Handlungsmöglichkeiten. Halle (Saale).

Redaktionsschluss
Mai 2021

Inhalt

Ursachen des Klimawandels 4

Der Treibhauseffekt: Eine einfache Energiebilanz bestimmt die Temperatur auf der Erde 5

Die atmosphärische Konzentration von CO_2 ist heute höher als je zuvor in den letzten 800.000 Jahren 6

Die Konzentration von CO_2 in der Atmosphäre ist in den letzten 60 Jahren kontinuierlich angestiegen 7

Die globale Temperatur ist bereits um 1,2 °C gestiegen. In Deutschland ist es 2 °C wärmer geworden 8

Die durch den Menschen verursachte Klimaerwärmung geschieht extrem schnell 9

Die dominante Ursache der modernen globalen Erwärmung ist menschliche Aktivität: Verbrennung fossiler Stoffe und Landnutzung 10

Wo verbleibt das vom Menschen freigesetzte CO_2? 11

Folgen des Klimawandels 12

Extreme Wetterereignisse werden häufiger und intensiver 13

Der Meeresspiegel steigt, der Ozean wird wärmer und saurer 14

Vom Eis geprägte Lebensräume sind am stärksten betroffen 15

Trockenheit und Dürre gefährden den Wald 16

1,5°C Erwärmung führt zum Verlust der meisten Korallenriffe 17

Der Klimawandel verursacht Hunger und Ernährungskrisen 18

Der Klimawandel schadet der Gesundheit 19

Kippelemente im Klimasystem könnten den Klimawandel verstärken oder sogar unumkehrbar machen 20

Das Auftauen des Permafrostbodens setzt weitere Klimagase frei 21

Maßnahmen gegen den Klimawandel 22

Die Menschheit hat nur noch ein begrenztes Kohlenstoffbudget zur Verfügung 23

Die bisher beschlossenen Emissionsreduzierungen reichen nicht aus 24

Sogenannte „Negative Emissionen“ können nur einen begrenzten Beitrag leisten 25

Eine CO_2-Bepreisung wäre ein wirksames Mittel zur Reduzierung der Emissionen 26

Die bestehenden Kohlenstoffsenken wie Böden, Wälder und Ozean müssen gesichert werden 27

Die internationale Verteilung des verbleibenden Budgets ist eine politisch-ethische Frage 28

Mitwirkende 29

Literatur 30

Ursachen des Klimawandels

Der Treibhauseffekt: Eine einfache Energiebilanz bestimmt die Temperatur auf der Erde 5

Die atmosphärische Konzentration von CO_2 ist heute höher als je zuvor in den letzten 800.000 Jahren........6

Die Konzentration von CO_2 in der Atmosphäre ist in den letzten 60 Jahren kontinuierlich angestiegen........7

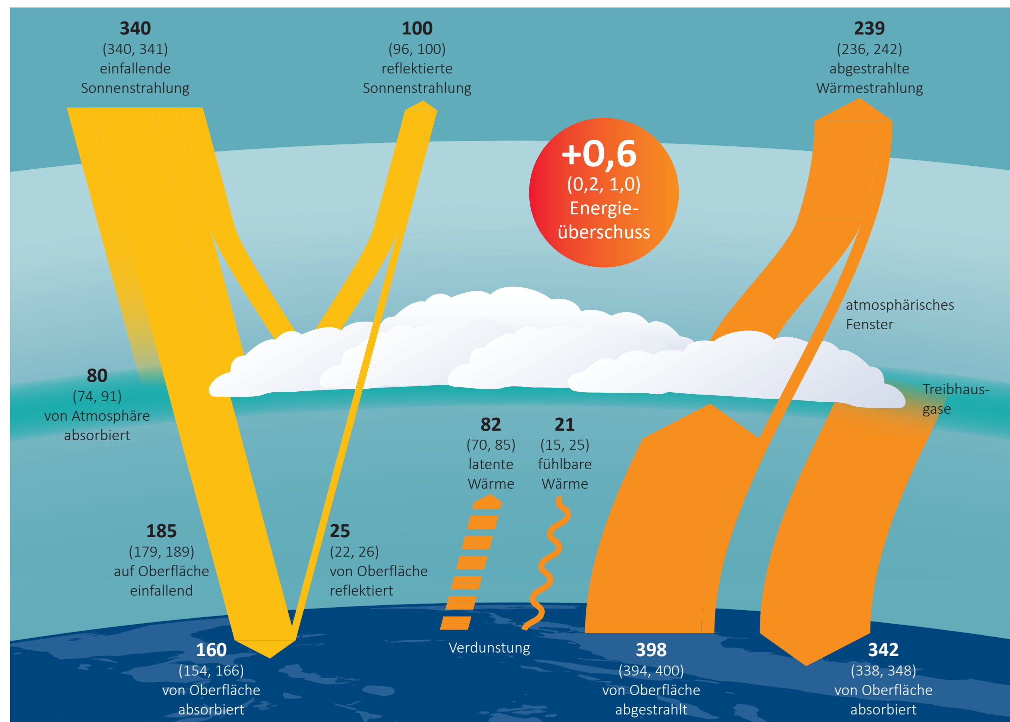
Die globale Temperatur ist bereits um 1,2 °C gestiegen. In Deutschland ist es 2 °C wärmer geworden........8

Die durch den Menschen verursachte Klimaerwärmung geschieht extrem schnell........9

Die dominante Ursache der modernen globalen Erwärmung ist menschliche Aktivität: Verbrennung fossiler Stoffe und Landnutzung........10

Wo verbleibt das vom Menschen freigesetzte CO_2?........11

Der Klimawandel bringt die Energiebilanz der Erde aus dem Gleichgewicht
in Watt pro Quadratmeter



Wie kommt es zum Klimawandel? Die Erwärmung der Atmosphäre entsteht dann, wenn die Rückstrahlung der Sonnenenergie durch die Erhöhung der Konzentrationen der Treibhausgase reduziert wird. Die Erhöhung der Konzentrationen der Treibhausgase bewirkt eine Abstrahlung aus größerer Höhe der Atmosphäre, wo es kälter ist. Dadurch gelangt weniger Wärmestrahlung zurück in den Weltraum. Der Überschuss an Energie wird als Erwärmung der Erdoberfläche und der unteren Atmosphäre gemessen. Die in Klammern angegebenen Zahlen geben den Unsicherheitsbereich an.

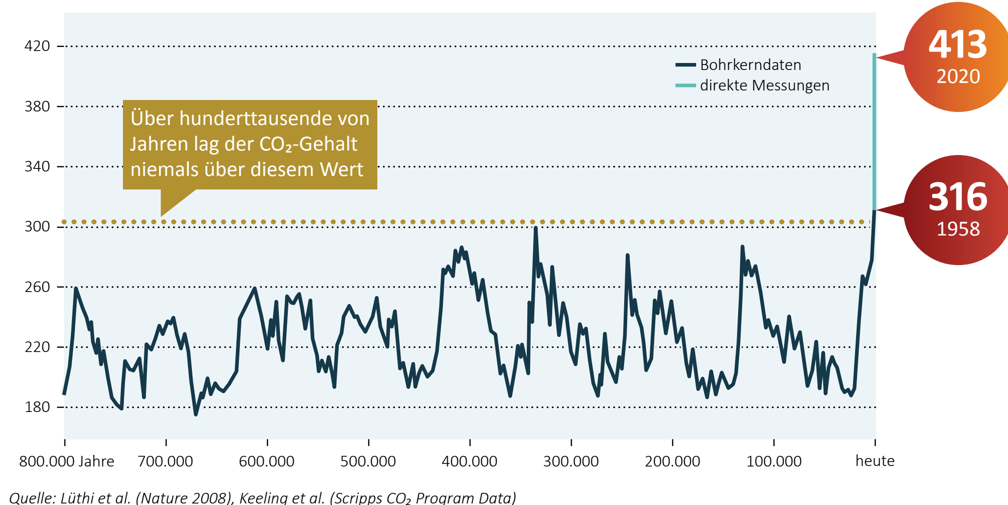
Quelle: Wild et al. (2015), Loeb et al. (J. Clim. 2009), Trenberth et al. (2009)

Der Treibhauseffekt: Eine einfache Energiebilanz bestimmt die Temperatur auf der Erde

- Der Schlüssel zum naturwissenschaftlichen Verständnis der menschengemachten globalen Erwärmung liegt in der Energiebilanz unseres Planeten und der Physik des Treibhauseffekts.
- Die Sonneneinstrahlung trifft auf die Erde, ein Drittel dieser Strahlung wird reflektiert, der Rest aufgenommen. Die Erde strahlt langwellige Wärmestrahlung ab und gleicht dadurch die von der Sonne kommende kurzwellige Strahlung aus (stabiles Klima).
- Wasserdampf, Kohlendioxid- und Methan-Moleküle in der Atmosphäre behindern die Abstrahlung von Wärme von der Erdoberfläche und strahlen einen Teil davon wieder zurück. Ohne diesen natürlichen Treibhauseffekt läge die globale Durchschnittstemperatur nicht bei rund 14 °C, sondern bei −18 °C. Leben wäre dann nicht möglich.
- Durch die Verbrennung fossiler Stoffe hat sich die Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre erhöht. Dadurch wird mehr Wärme auf die Erde zurückgestrahlt. Die Temperatur an der Erdoberfläche und in der unteren Atmosphäre erhöht sich.
- Der durch den Menschen verursachte Treibhauseffekt verändert die Energiebilanz der Erde und hat zu einem Überschuss des Energieflusses von 0,6 Watt/m^2/Sekunde geführt.
- Rückstände der Verbrennung fossiler Stoffe in der Atmosphäre (Aerosole) haben jedoch gleichzeitig einen kühlenden Effekt.

Quellen: Loeb et al. 2009, Trenberth et al. 2009, Wild et al. 2014.

CO_2-Gehalt der Atmosphäre in den letzten 800.000 Jahren
in ppm („parts per million“ = Millionstel)



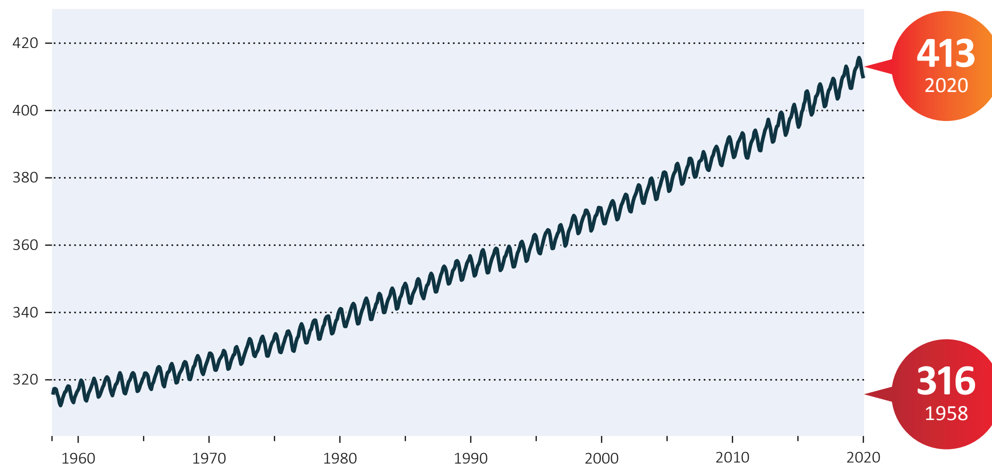
Quelle: Lüthi et al. (Nature 2008), Keeling et al. (Scripps CO_2 Program Data)

Die atmosphärische Konzentration von CO_2 ist heute höher als je zuvor in den letzten 800.000 Jahren

- Der CO_2-Gehalt der Atmosphäre (und damit das Klima) hat sich im Laufe der Erdgeschichte immer wieder stark verändert.
- Die Klimaveränderungen waren die Folge von Änderungen der Energiebilanz (s.o.) und können verschiedene Ursachen haben:
  1. Änderungen der Leuchtkraft der Sonne.
  2. Änderungen der Erdumlaufbahn um die Sonne.
  3. Änderungen im Gehalt der Atmosphäre an klimarelevanten Gasen (CO_2, Methan) und Aerosolen (Schwebeteilchen, die z.B. aus Vulkanausbrüchen stammen).
  4. Eisbedeckung, Bewölkung und Verteilung der Kontinente, denn auch diese beeinflussen, wieviel Energie zurück ins All reflektiert wird (Albedo-Effekt).
- Die Hauptinformationsquelle zur Erforschung der Klimageschichte der Erde sind Ablagerungen aus den betreffenden Zeiten, zum Beispiel Sedimente an Land und in Seen und Ozeanen sowie Eismassen. Isotopenanalysen von Kalkschalen von Mikroplankton liefern Informationen über vergangene Temperaturen, während im Eis eingeschlossene Luftbläschen Proben der damaligen Atmosphäre liefern, einschließlich der Treibhausgaskonzentrationen. So weiß man zum Beispiel, dass es in den vergangenen 800.000 Jahren keine Periode mit auch nur annähernd so hohen CO_2-Konzentrationen gab wie heute.
- In den letzten 10.000 Jahren lag die CO_2-Konzentration relativ stabil bei 250-275 ppm („parts per million“ – Anteile pro Million).
- Seit der industriellen Revolution Mitte des 18. Jahrhunderts und der damit verbundenen Nutzung fossiler Energieträger und der Landgewinnung durch Abholzung sind die Konzentrationen von CO_2 und CH_4 (Methan) weit über den natürlichen Schwankungsbereich der letzten 800.000 Jahre angestiegen.
- Jüngste Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass vermutlich sogar in den letzten 3 Mio. Jahren die Konzentration von CO_2 in der Atmosphäre nie höher lag als heute.
- Die hohen CO_2-Konzentrationen in der Atmosphäre können langfristig Teile des Klimasystems destabilisieren und gravierende Folgen haben.

Quelle: Lüthi et al. 2008; Willeit et al. 2019., Keeling et al.

CO_2-Gehalt der Atmosphäre seit 1958
in ppm („parts per million“ = Millionstel)



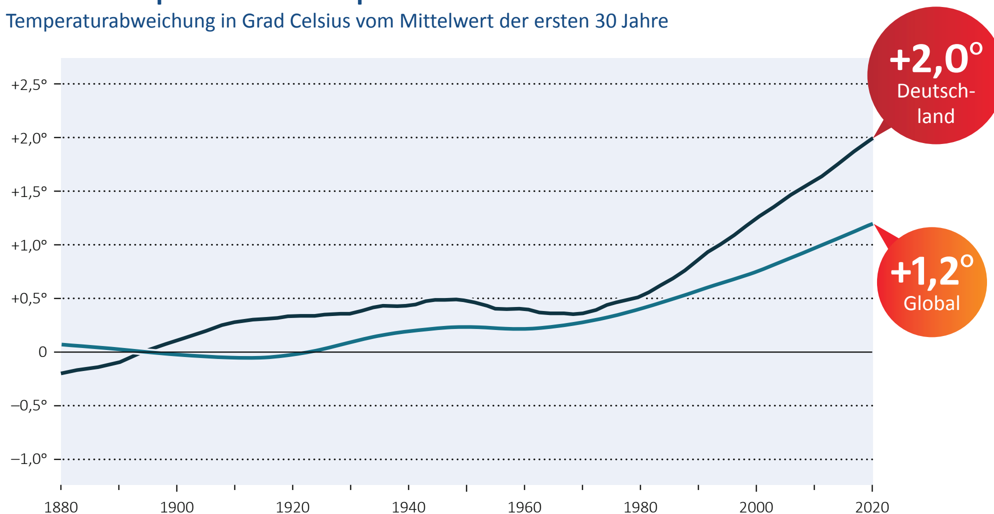
1958 begannen auf der Insel Mauna Loa die direkten Messungen des CO_2-Gehalts der Atmosphäre. Der stetige Anstieg wird nur durch die Vegetationsperiode auf der Nordhalbkugel unterbrochen. Diese führt alljährlich zu einer periodischen Abnahme der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre.
Quelle: NOAA (2020), Keeling et al. (2001)

Die Konzentration von CO_2 in der Atmosphäre ist in den letzten 60 Jahren kontinuierlich angestiegen

- Seit dem Jahr 1958 wird auf dem Vulkan Mauna Loa (Hawaii, USA) die CO_2-Konzentration direkt gemessen. Da die Messstation sehr hoch liegt (3397 m über dem Meeresspiegel) und kaum durch lokale Faktoren beeinflusst ist, können die dort festgestellten CO_2-Konzentrationen als gute Annäherung an die tatsächliche globale Konzentration betrachtet werden.
- Seit Beginn der Messung steigt die Konzentration kontinuierlich an. Im März 2021 hat sie mit 417 ppm einen neuen Höchstwert erreicht. Dies ist der höchste Stand seit mindestens 800.000 Jahren.
- Lediglich in den Jahren der Ölkrise (ab 1970) und nach dem Kollaps der Wirtschaftssysteme im ehemaligen Ostblock nach Ende des Kalten Krieges (1990) war der Anstieg abgeschwächt.
- Mit der Messreihe konnte erstmals der Zusammenhang zwischen der Verbrennung fossiler Stoffe und der Konzentration des Treibhausgases CO_2 aufgezeigt werden. Bei der ersten Messung 1958 lag die Konzentration bei rund 316 ppm.
- Die Messreihe zeigt einen charakteristischen, schwankenden Jahresverlauf: während des Sommers auf der Nordhalbkugel nimmt die globale CO_2-Konzentration ab, da die Vegetation in dieser Zeit vermehrt Kohlenstoff aufnimmt. Im Winter steigt die globale CO_2-Konzentration wieder an, da die Pflanzen die Photosynthese stark reduzieren. Die geringere Vegetation im Süden kann die vermehrte Freisetzung nicht ausgleichen.

Quelle: Scripps Institution, NOAA (Global Monitoring Laboratory).

Globale Temperatur und Temperatur in Deutschland seit 1880
Temperaturabweichung in Grad Celsius vom Mittelwert der ersten 30 Jahre



Über Land steigt die Temperatur in Folge des Klimawandels schneller an als über dem Ozean. So ist auch in Deutschland die Durchschnittstemperatur seit 1880 schon um 2 Grad angestiegen. Die dargestellten Kurven zeigen den langfristigen Trend.
Quelle: DWD/NASA GISTEMP

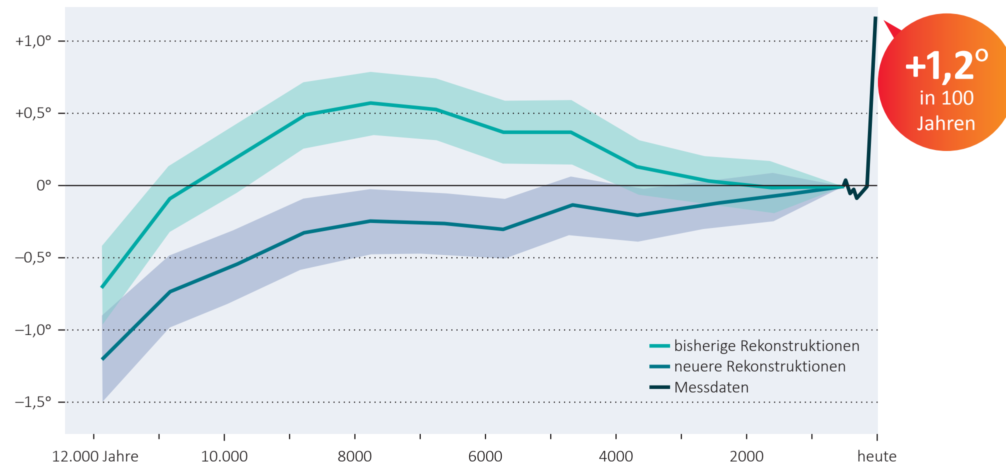
Die globale Temperatur ist bereits um 1,2 °C gestiegen. In Deutschland ist es 2 °C wärmer geworden

- Seit dem 18. Jahrhundert wird mit Wetterstationen auf der Erde die Temperatur gemessen, seit Mitte des 19. Jahrhunderts an hinreichend vielen Orten, um einen robusten globalen Mittelwert bilden zu können. In der Grafik lassen sich in Bezug auf die globale Temperatur drei Phasen erkennen. Bis 1940 erwärmte sich die Erde leicht, anschließend stagnierte die Temperatur bis in die 1970er Jahre, vor allem durch die Zunahme kühlender Aerosole (Luftverschmutzung). Seither gibt es einen starken Erwärmungstrend.
- Das Ausmaß der Erwärmung ist über Land in der Regel erheblich größer als über dem Ozean. Die globale Temperatur über dem Land lag 2015 bis 2019 um ca. 1,7 °C über den Werten der vorindustriellen Jahre 1850 bis 1900.
- Der von Menschen verursachte Anstieg der Treibhausgase (vor allem Kohlendioxid und Methan) erwärmte seit dem 19. Jahrhundert die Erdoberfläche (Land und Ozean) im Mittel um 1,2 °C.
- Das Jahresmittel der Lufttemperatur ist im Flächenmittel von Deutschland von 1881 bis 2019 um 2 °C angestiegen. Auch die Nordsee ist in diesem Zeitraum 2 °C wärmer geworden.
- Schwankungen der Sonneneinstrahlung, Vulkanausbrüche oder die natürliche Variabilität im Klimasystem liefern keine messbaren Beiträge zur globalen Erwärmung seit 1951. Die Leuchtkraft der Sonne hat in dieser Zeit sogar minimal abgenommen.

Quellen: Deutscher Wetterdienst, NASA.

Globale Temperatur seit Ende der letzten Eiszeit

Temperaturabweichung in Grad Celsius



Das Klima auf der Erde hat sich im Verlauf des Holozäns stark verändert. Die Veränderungen, die wir im Moment erleben, laufen jedoch schneller ab als das bei natürlichen Prozessen der Fall ist.

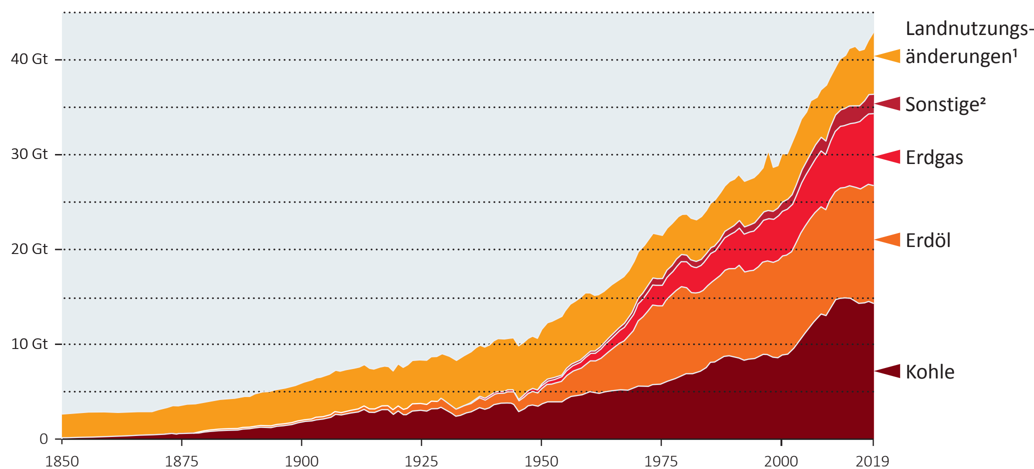
Quelle: Bova et al. (Nature 2021), Shakun et al. (Nature 2012), Marcott et al. (Science 2013), NASA GISTEMP

Die durch den Menschen verursachte Klimaerwärmung geschieht extrem schnell

- Die moderne globale Erwärmung geschieht extrem rasch im Vergleich zu dem, was die Klimaforschung bislang über natürliche globale Temperaturzunahmen in der Erdgeschichte herausgefunden hat.
- Inzwischen gibt es genug Daten aus allen Weltteilen, um die globale Mitteltemperatur über die letzten 20.000 Jahre – seit dem Höhepunkt der letzten Eiszeit – berechnen zu können. Diese Daten weisen darauf hin, dass die globale Temperatur heute wahrscheinlich schon höher liegt als jemals im Holozän – und damit höher als jemals in der Geschichte der menschlichen Zivilisation.
- Diese Daten sind auch mit den Modellberechnungen früherer Temperaturen konsistent.
- Aus der Erdgeschichte kennen wir allerdings auch starke und abrupte regionale Temperaturänderungen.
- Ein Beispiel hierfür ist das Paläozän/Eozän-Temperaturmaximum (PETM) vor etwa 55 Millionen Jahren. Innerhalb von 4000 Jahren stieg die Temperatur um rund 6 °C. Das PETM war eine nach geologischen Maßstäben sehr kurze, aber extreme Erwärmungsphase. Der aktuell beobachtete Klimawandel läuft noch viel schneller ab.

Quellen: Shakun et al. - 2012; Marcott et al. - 2013; Bova et al. - 2021.; NASA GISTEMP

Gesamte globale CO_2-Emissionen 1850–2019
nach Herkunft, in Milliarden Tonnen CO_2 (Gt)



Der bei weitem überwiegende Teil des Kohlendioxid-Ausstoßes, der jedes Jahr von menschlichen Aktivitäten verursacht wird, stammt aus der Verbrennung fossiler Energieträger wie Kohle, Erdöl oder Erdgas.
1 Z. B. Entwaldung, Trockenlegung von Feuchtgebieten
2 Z. B. Zementproduktion und Abfackeln von Erdgas
Quelle: Global Carbon Project (2020)

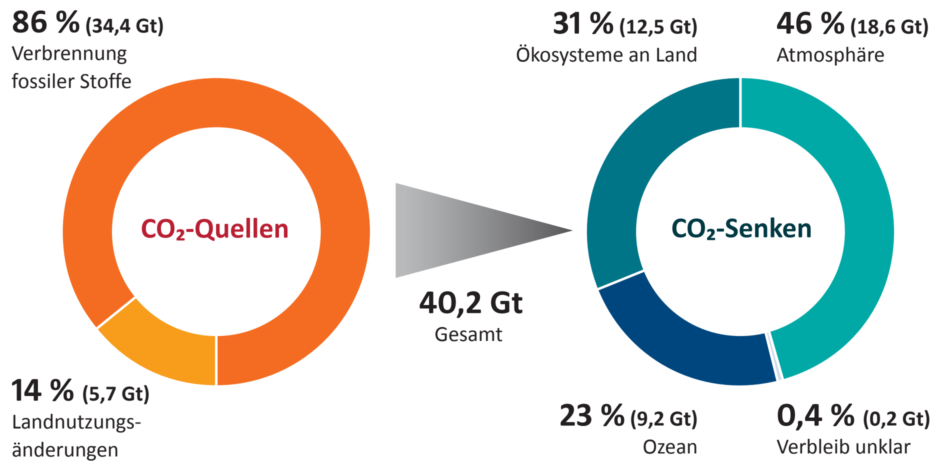
Die dominante Ursache der modernen globalen Erwärmung ist menschliche Aktivität: Verbrennung fossiler Stoffe und Landnutzung

- Der allergrößte Anteil des zurzeit beobachteten Klimawandels ist durch den Menschen verursacht.
- Ohne die Berücksichtigung der Zunahme der Treibhausgase in der Atmosphäre kann man die beobachtete Erwärmung des Klimasystems, insbesondere diejenige seit den 1950er Jahren, nicht erklären.
- Der Beitrag von Schwankungen der Sonne über diesen Zeitraum ist sehr klein.

Quellen: Global Carbon Project - 2020.

Wo das vom Menschen freigesetzte CO_2 bleibt

Jährliche Mengen in Prozent und in Milliarden Tonnen (Gt), 2010–2019



Nur ein Teil des Kohlendioxids verbleibt in der Atmosphäre. Auch der Ozean und Ökosysteme an Land (wie die Wälder) nehmen Kohlenstoffdioxid auf. Ohne diese „Senken" würde der Klimawandel noch stärker ausfallen.

Quelle: Global Carbon Budget (2020)

Wo verbleibt das vom Menschen freigesetzte CO_2?

- Die Quellen und der Verbleib von anthropogenem CO_2 werden genau analysiert. Die von Menschen freigesetzten CO_2-Emissionen der Jahre 2009–2018 stammen zu 86 % aus der Verbrennung fossiler Stoffe, 14 % aus Landnutzungsänderungen.
- Ein Teil dieser Emissionen (31 %) wird von Landökosystemen aufgenommen, ein weiterer Teil vom Ozean (23 %).
- Der größte Teil der menschengemachten CO_2-Emissionen verbleibt in der Atmosphäre (46 %).

Quellen: Global Carbon Project - 2020.

Folgen des Klimawandels

Extreme Wetterereignisse werden häufiger und intensiver..13

Der Meeresspiegel steigt, der Ozean wird wärmer und saurer...................................14

Vom Eis geprägte Lebensräume sind am stärksten betroffen......................................15

Trockenheit und Dürre gefährden den Wald 16

1,5°C Erwärmung führt zum Verlust der meisten Korallenriffe 17

Der Klimawandel verursacht Hunger und Ernährungskrisen.......................................18

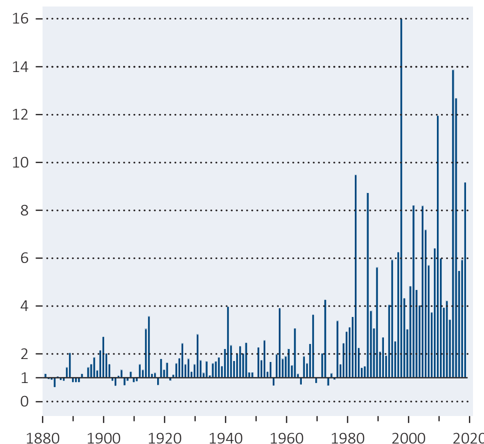
Der Klimawandel schadet der Gesundheit...19

Kippelemente im Klimasystem könnten den Klimawandel verstärken oder sogar unumkehrbar machen...20

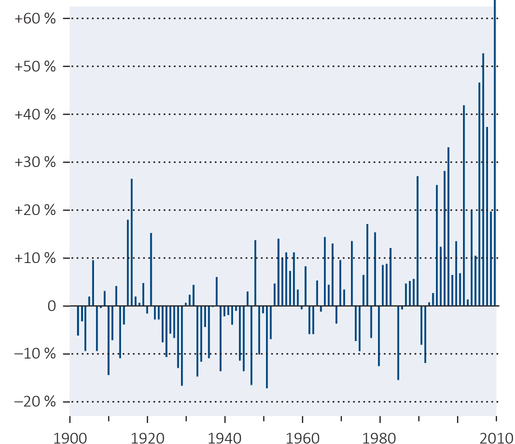
Das Auftauen des Permafrostbodens setzt weitere Klimagase frei 21

Temperaturrekorde und Niederschläge werden häufiger und extremer

Temperaturrekorde pro Jahr weltweit 1880–2020, Faktor der Zunahme im Vergleich zu einem stabilen Klima



Niederschlagssummen: Veränderung der Anzahl der Rekordereignisse pro Jahr in Prozent 1900–2010



Weltweit steigen die Rekorde bei den Temperaturen und der maximalen Niederschlagsmenge immer weiter an.

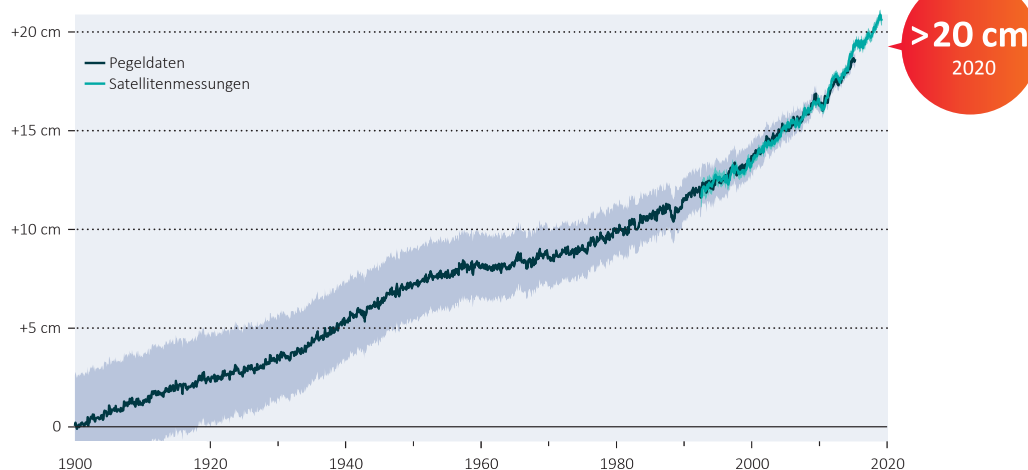
Quelle: Lehmann et al. (Clim. Change 2015), DWD

Extreme Wetterereignisse werden häufiger und intensiver

- Weltweit sind extreme Wetterereignisse die für den Menschen am unmittelbarsten spürbaren Auswirkungen des Klimawandels, so z.B. die verheerenden Waldbrände 2020 in Australien, die andauernde Dürre im südlichen Afrika oder die Hitze am Polarkreis in Sibirien mit bis zu 38 °C.
- Weltweit nimmt die Häufigkeit extremer Wetterereignisse zu, insbesondere von Hitzeextremen, Dürren, Extremniederschlägen und starken Tropenstürmen. Es ist statistisch anspruchsvoll, bei Extremwettern eine Zunahme nachzuweisen. Das hat mit der Seltenheit von Extremen und den historischen Messdaten zu tun. Daher war zum Beispiel lange umstritten, ob besonders starke tropische Wirbelstürme tatsächlich häufiger werden, wie physikalisch zu erwarten wäre und wie es die Beobachtungsdaten nahelegen.
- Im Jahr 2019 hat das Expertengremium der meteorologischen Weltorganisation WMO zu Tropenstürmen erstmals gefolgert, dass es eine messbare weltweite Zunahme von Tropenstürmen von Hurrikan-Stärke seit Anfang der 1980er Jahre gibt.
- Ein vermehrtes Auftreten von Extremtemperaturen kann man auch in Deutschland feststellen. So wurden 2019 zum ersten Mal in der Geschichte der Wetteraufzeichnungen an drei Tagen hintereinander 40 °C oder mehr gemessen. An 23 Messstellen stieg die Temperatur auf mindestens 40 °C. Der Juli 2019 war insgesamt der heißeste Monat seit Beginn der Wetteraufzeichnungen. Die große Hitze macht sich auch an einer hohen Zahl an Waldbränden bemerkbar.
- Hitzewellen führen zu erhöhter Sterblichkeit. So hat der „Jahrhundertsommer“ 2003 in Europa rund 70.000 Menschenleben gefordert. Darüber hinaus führen Extremereignisse zu gravierenden Schäden in der Landwirtschaft.
- Extreme Wetterereignisse wie z.B. Dürren gefährden mittelfristig auch in Deutschland unsere Versorgung mit Ressourcen wie Wasser und landwirtschaftlichen Produkten.

Quellen: Robine et al. - 2008; Deutscher Wetterdienst; Lehmann et al. - 2015; Watts et al - 2020; World Desaster Report - 2020

Veränderung des globalen Meeresspiegels 1900–2020
in Zentimetern



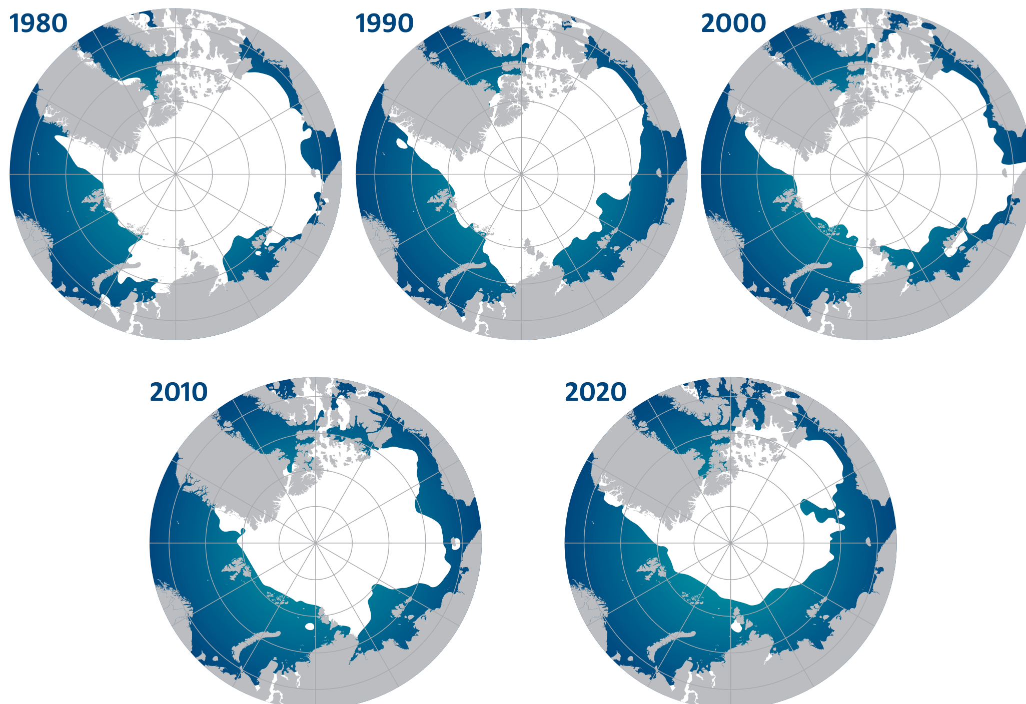
Der Meeresspiegel ist seit 1900 rund 20 Zentimeter angestiegen. Das wurde mithilfe von Pegeldaten und Satellitenmessungen festgestellt.
Quelle: Dangendorf et al. (2019)

Der Meeresspiegel steigt, der Ozean wird wärmer und saurer

- Satellitengestützte Messungen zeigen, dass sich der Masseverlust durch Abschmelzen von Eis in Grönland und in der Antarktis seit 1990 beschleunigt. Seit 1993 ist der Meeresspiegel um fast 10 cm gestiegen.
- Durch das Abschmelzen der Eisschilde von beispielsweise Grönland und der Antarktis in Folge der Erderwärmung könnte der Meeresspiegel um mehrere Meter ansteigen. Hiervon wären rund 400 Millionen Menschen betroffen.
- Die Erwärmung betrifft nicht nur die Atmosphäre, sondern vor allem den Ozean. Die Ozeane haben seit 1970 rund 90 % der durch den Treibhauseffekt zusätzlich erzeugten Wärme aufgenommen. Marine Hitzewellen sind intensiver geworden, und ihre Häufigkeit hat sich seit 1982 verdoppelt.
- Warmes Wasser dehnt sich aus. Die aufgrund der Klimaerwärmung erfolgte Ausdehnung ist für 1,4 mm pro Jahr, also etwa 40 % des Anstiegs des Meeresspiegels verantwortlich.
- Die zunehmende Erwärmung und Versauerung der Ozeane beeinträchtigt Meeresorganismen und bedroht damit die Lebensgrundlage vieler Menschen.

Quellen: Dangendorf et al – 2019; Shepherd et al. – 2019.

Ausdehnung des arktischen Meereises 1980-2020
jeweils im August



Die Fläche, die im Sommer um den Nordpol noch von Eis bedeckt ist, nimmt seit Jahrzehnten immer mehr ab.
Quelle: NSIDC

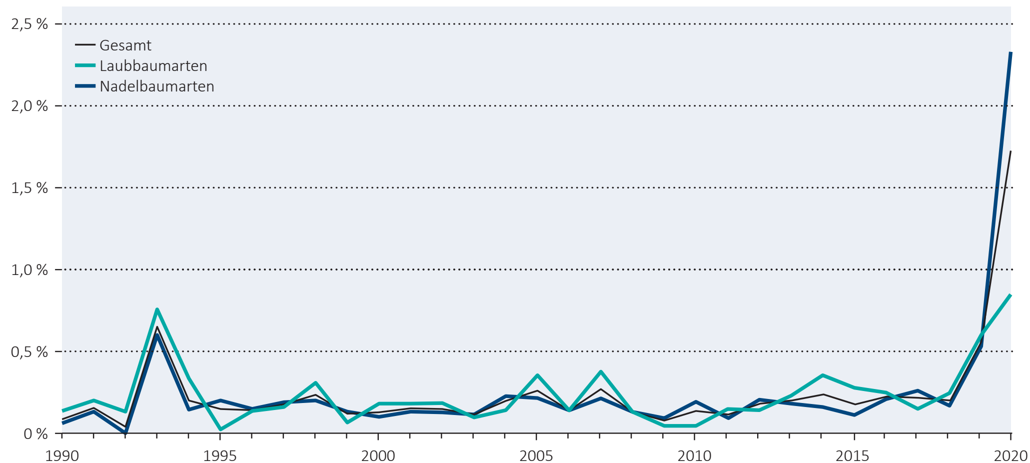
Vom Eis geprägte Lebensräume sind am stärksten betroffen

- Der aktuell zu beobachtende globale Eisverlust ist dramatischer, als es von den negativsten Szenarien prognostiziert wurde. Der Eisverlust hat gegenüber den 1990er Jahren um 57 % zugenommen. Besonders beschleunigt hat sich dieser Verlust bei den Eisschilden Grönlands und der Antarktis.
- Grönlands Eismassen könnten bei 1,6 °C Erwärmung komplett schmelzen. Da der grönländische Eisschild auf festem Land liegt, hätte das Abschmelzen drastische Auswirkungen auf den Meeresspiegel, das Leben in den Küstenregionen und wohl auch für das Klima in Europa.
- Die Antarktis ist der größte Eisspeicher der Welt. Insbesondere marine Eisschild-Gebiete in der Westantarktis (vor allem in der Amundsen-Region) werden jedoch immer instabiler. Die Destabilisierung des Gletscherrands (Schelfeis) hat auch Auswirkungen auf das antarktische Inlandseis.
- Wenn das Meereis verschwindet, wird Sonnenergie von den Ozeanen und der Atmosphäre aufgenommen, statt vom Eis reflektiert zu werden. Dadurch erwärmt sich die Arktis schneller als jede andere Region auf der Erde.
- Auch das Gebirge ist vom Klimawandel betroffen. Am deutlichsten wird dies beim Rückgang der Gletscher sichtbar. Auch wenn Gletscher in Warmzeiten natürlicherweise Eis verlieren, ist das gegenwärtige Tempo ohne Beispiel.
- Allein in Asien sind rund 220 Millionen Menschen komplett auf Gletscherwasser angewiesen. Gletscherwasser versorgt diese Menschen unabhängig von Dürreereignissen.
- Auch in den Alpen hat der Klimawandel negative Auswirkungen auf Siedlungen, Infrastruktur und den Tourismus. Veränderte Gefriervorgänge vergrößern die Naturgefahren wie Lawinen, Erdrutsche und Hochwasser.

Quellen: Spehn & Körner – 2017; IPCC – 2019 ; Pritchard – 2019; Slater et al. – 2021; NSIDC; NASA 2021.

Absterberate von Bäumen

in Prozent, 1990–2019



Für den Waldzustandsbericht werden 10.000 ausgewählte Bäume in jedem Jahr untersucht. Die Trockenheit in den vergangenen Jahren macht die Bäume anfälliger für Schädlinge und hat zu einem extremen Anstieg beim Absterben vor allem von Fichten, aber auch von Eichen und Kiefern geführt.

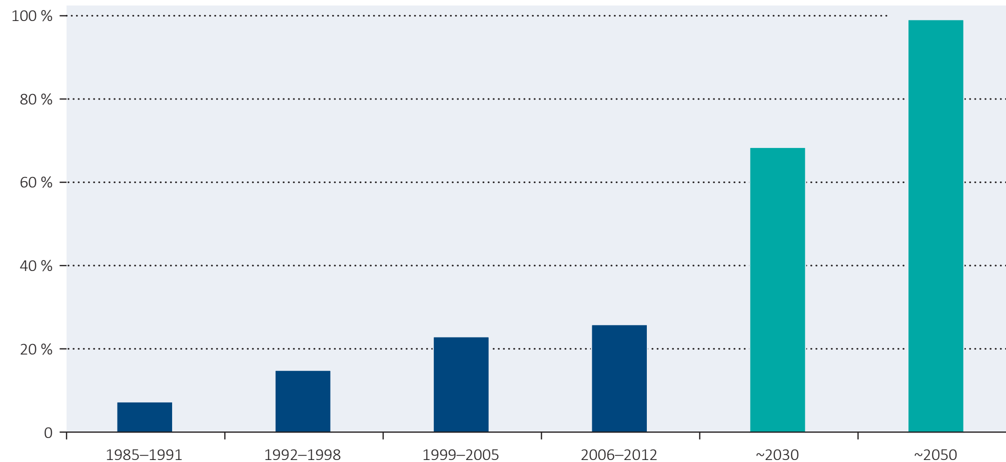
Quelle: BMEL 2021

Trockenheit und Dürre gefährden den Wald

- Wälder sind besonders anfällig für den Klimawandel. Bereits ein Temperaturanstieg um 1 °C kann das Funktionieren eines Waldes gefährden. Der Wald setzt dann gespeichertes CO_2 frei, statt CO_2 aufzunehmen.
- Auch in Deutschland gefährden Stürme, Hitze und Trockenheit den Wald. So sind die unmittelbaren Folgen von mehreren Hitzesommern deutlich zu sehen. Baumarten wie Fichte und Buche leiden unter Wassermangel. Dies macht sie anfälliger für Schädlinge. Die mittlere Kronenverlichtung war 2020 im Durchschnitt aller Baumarten mit 27 Prozent so hoch wie noch nie.
- Auch in Deutschland wird die Bedrohung durch Waldbrände zunehmen.

Quelle: IPBES – 2019; BMEL - 2020; IPCC - 2018 Sonderbericht 1,5°C; CBD

Die Ozeanerwärmung gefährdet die Korallenbestände
Anteil geschädigter Korallen 1985–2012 weltweit in Prozent und Prognose



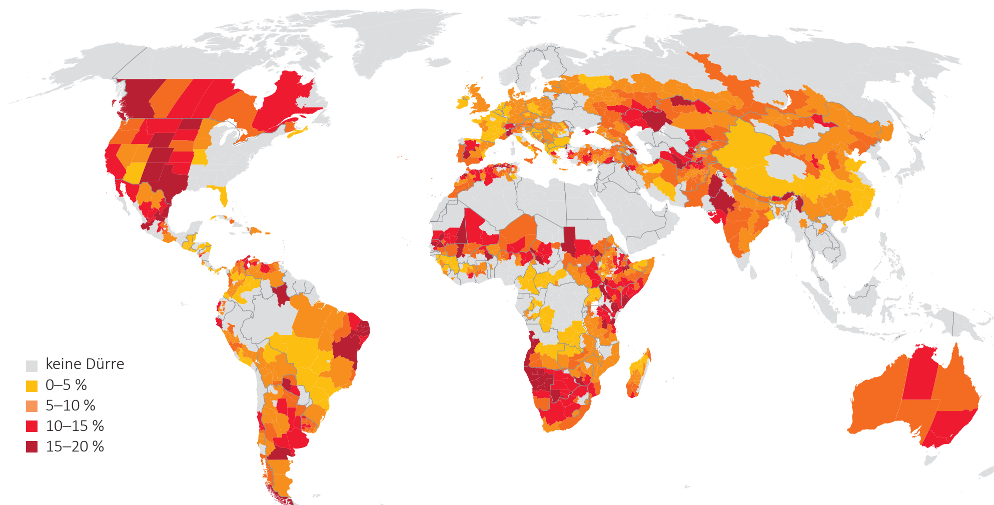
Von 1985 bis 2012 ist der Anteil geschädigter Korallen auf rund 25 % gestiegen. Grund für die Korallenbleiche und das anschließende Absterben ist die Klimaerwärmung. Bis zum Jahr 2050 könnten fast alle Korallenbestände hiervon betroffen sein.
Quelle: Heron et al. 2016

1,5 °C Erwärmung führt zum Verlust der meisten Korallenriffe

- Korallen reagieren empfindlich auf wärmere Temperaturen. Bei Hitzestress stoßen sie die in ihnen lebenden Algen ab. Die Korallen verlieren ihre Farbe (Korallenbleiche).
- Massive Folgen des Klimawandels für die biologische Vielfalt sind daher im Meer zu beobachten: Korallenriffe werden wahrscheinlich häufiger einer extremen Erwärmung mit kürzeren Erholungszeiten ausgesetzt sein. Dies führt zu massiver Korallenbleiche und dem großflächigen Absterben von Korallenbeständen.
- Die aktuellsten Untersuchungen (aus dem Jahr 2016) zeigen, dass 50–70 % der Korallenbestände geschädigt sind.
- Bei einem globalen Temperaturanstieg um 1,5 °C werden 70–90 % der Korallenbestände verschwinden, bei 2 °C mehr als 99 %.
- Korallen haben eine wichtige Funktion als Riffbildner: ihr Verschwinden hat massive Auswirkungen auf Fischbestände innerhalb und auch außerhalb der Korallenriffe.

Quellen: Jones et al. - 2004; Heron et al. - 2017; IPCC – 2018, 2019; IPBES – 2019; Hughes et al. – 2020.

Beispiel für landwirtschaftliche Schäden: Dürren auf Weideflächen
Anteil der 2004 bis 2018 von Dürre betroffenen Weidefläche, in Prozent



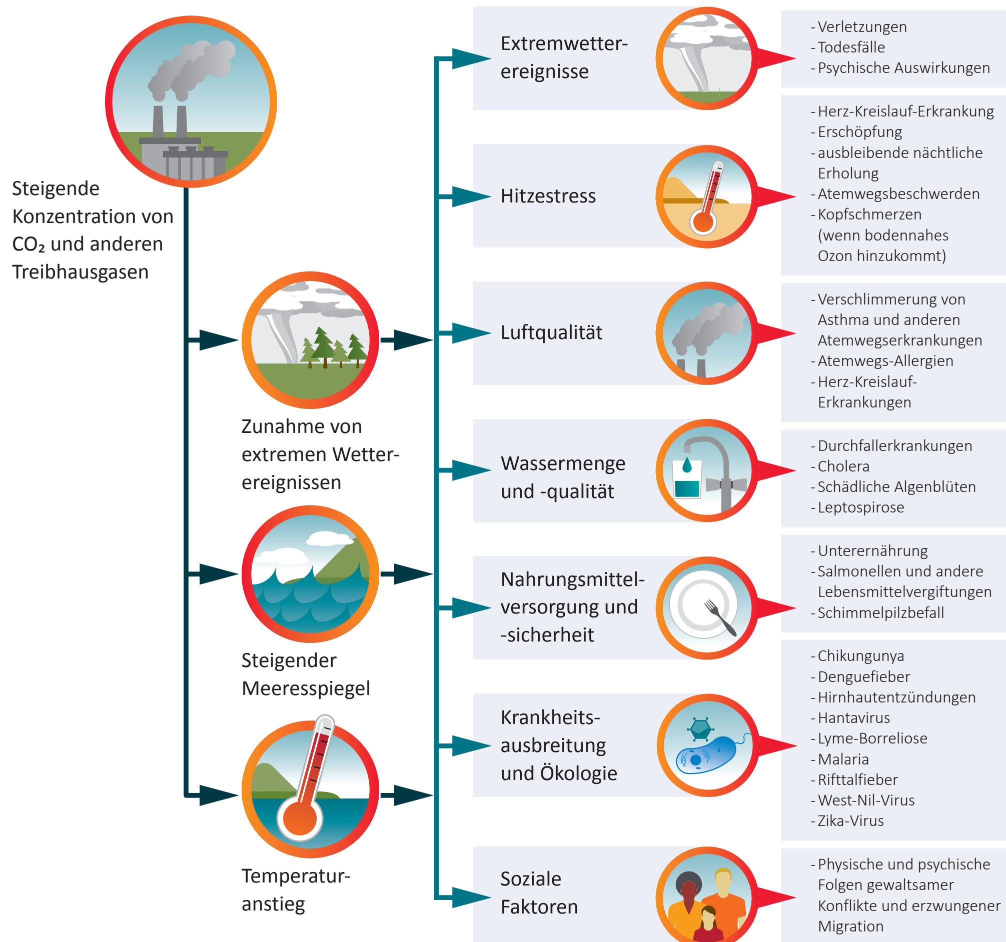
Die Karte zeigt den Anteil des weltweiten Weidelandes, der im Zeitraum zwischen 2004 und 2018 von Dürren betroffen war.
Quelle: EU JRC ASAP

Der Klimawandel verursacht Hunger und Ernährungskrisen

- In der Landwirtschaft werden sich die Folgen des Klimawandels am stärksten bemerkbar machen. Der Klimawandel beeinflusst die Produktion von Lebensmitteln, ihre Qualität, ihren Preis und ihre Verfügbarkeit. Er ist damit ein zusätzlicher Faktor, der dem Erreichen des „Zero Hunger“-Ziels für Nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen (UN-SDGs) entgegenwirkt.
- Der Klimawandel wirkt sich über den Temperaturanstieg, die Verschiebung von Klimazonen und extreme Wetterereignisse weltweit negativ auf die Erträge von Landwirtschaft, Viehhaltung und Fischerei aus.
- Zu einer zusätzlichen Verknappung der landwirtschaftlichen Erträge kommt es durch Ernte- und Nachernteverluste infolge der klimatisch bedingten verstärkten Ausbreitung von Schädlingen und Krankheiten.
- Langfristig ist davon auszugehen, dass die klimawandelbedingten Verschiebungen in der weltweiten landwirtschaftlichen Produktion den internationalen Handel mit Lebensmittel verändern werden.

Quellen: Chakraborty & Newton – 2011; Elliot et al – 2014; Rosenzweig et al. – 2014; Grace et al. – 2015; FAO - 2018.

Gesundheitsrisiken durch Klimawandel



Modifiziert nach Haines et al. (NEJM 2019)

Der Klimawandel schadet der Gesundheit

- Folgen des Klimawandels mit direkter Auswirkung auf die menschliche Gesundheit sind unter anderem Hitzestress und eine dadurch erhöhte Sterblichkeit. Deutschland lag mit über 2000 Hitzetoten im Jahr 2018 zuletzt weltweit an dritter Stelle.
- Die Fähigkeit des menschlichen Körpers, sich an starke Hitze anzupassen, ist sehr begrenzt. Hitzestress belastet das Herzkreislaufsystem, vermindert die Erholung während des Schlafes, beeinträchtigt kognitive Leistungen, senkt die Arbeitsproduktivität und erhöht die Unfallgefahr.
- Wärmere Temperaturen können auch die Ausbreitung von Infektionskrankheiten begünstigen, unter anderem solche, die von Mücken oder Zecken übertragen werden. Das betrifft z. B. Borreliose und Frühsommer-Meningoenzephalitis (FSME), aber auch Erkrankungen, die man bisher eher aus der Reisemedizin kannte, wie Rickettsiosen oder das über heimische Mücken übertragene West-Nil-Fieber.
- Hinzu kommt, dass zunehmend Mücken und Zecken aus wärmeren Gefilden hier heimisch werden, wie beispielsweise die Asiatische Tigermücke, welche Dengue-Fieber, Zika und Chikungunya übertragen kann.
- Zwischen 2030 und 2050 kann der Klimawandel laut Weltgesundheitsorganisation allein durch Mangelernährung, Malaria, Durchfallerkrankungen und Hitzestress schätzungsweise 250 000 Todesopfer pro Jahr fordern.

Quellen: Watts et al. – 2020; Haines & Ebi – 2019.

Kippelemente im Klimasystem



Auf dem ganzen Globus gibt es geologische und ökologische Systeme, die durch den Klimawandel aus dem Gleichgewicht gebracht werden. Einige dieser Veränderungen wirken sich verstärkend auf den Klimawandel aus, so dass dieser sich von selbst beschleunigen und nicht mehr aufhalten lassen könnte.
nach Lenton et al. (Nature 2019)

Kippelemente im Klimasystem könnten den Klimawandel verstärken oder sogar unumkehrbar machen

- Einige Elemente des Klimasystems haben kritische Schwellenwerte, bei deren Überschreiten es zu starken und teils unaufhaltsamen und unumkehrbaren Veränderungen kommt.
- So kann die Veränderung von Meeresströmungen zu einer Veränderung der klimatischen Verhältnisse führen. Ein Beispiel hierfür ist die Abschwächung der atlantischen Umwälzzirkulation („Golfstrom“), die zu einer massiven Abkühlung in Europa führen könnte.
- Auch die Eisschilde auf Grönland und Antarktis haben Kipp-Punkte, bei deren Überschreitung große Eisgebiete langfristig unwiederbringlich verloren wären. Grund hierfür sind mehrere selbstverstärkende Eis-Klima-Rückkopplungen (insbesondere die Marine Eisschild-Instabilität, die Eis-Albedo-Rückkopplung, die Höhe-Schmelz-Rückkopplung).
- Der Eisverlust der Westantarktis hat sich in den letzten 25 Jahren verdreifacht.

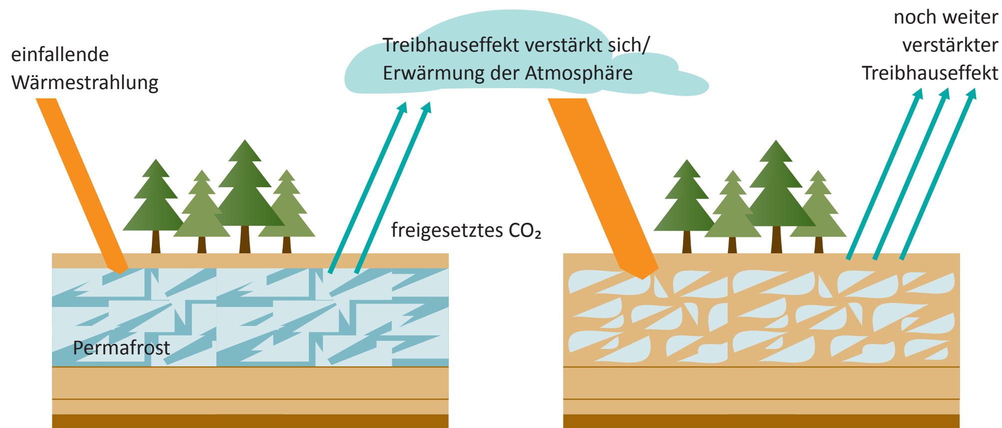
Quellen: Heron et al. - 2017; Caesar et al. - 2018; Lenton et al. - 2019; Steffen et al. - 2019.

Beispiel für ein Kippelement: Permafrost

Die Permafrostböden der Arktis speichern rund die Hälfte des weltweit in Böden gespeicherten Kohlenstoffs

1. Die globale Erwärmung führt zum Auftauen der Böden. Dadurch entweicht der dort gespeicherte Kohlenstoff.

2. Der frei gesetzte Kohlenstoff verstärkt als CO_2 in der Atmosphäre weiter den Treibhauseffekt.



Das Auftauen des Permafrostbodens setzt weitere Klimagase frei

- Die Permafrostgebiete Sibiriens werden zunehmend von Hitzewellen heimgesucht. Die obere Bodenschicht taut in jedem Sommer immer länger und immer tiefer auf.
- Die Folgen der Erwärmung in der borealen und subborealen Arktis sind häufiger auftretende großflächige Feuer, die Erosion von Erdmassen und auch das Verschwinden großer Wasserflächen.
- Im auftauenden Boden haben es Mikroorganismen leichter, pflanzliche und tierische Biomasse zu zersetzen. Dies führt zur Freisetzung der Klimagase Methan und CO_2. Die Arktis könnte vom Speicher zur Quelle von Klimagasen werden und den Klimawandel beschleunigen.
- Daher wird das Auftauen des Permafrostbodens als Kippelement im Klimasystem bezeichnet. Ab einem bestimmten Punkt könnte eine Kaskade weiterer Klimafolgen ausgelöst werden.
- Schätzungen gehen davon aus, dass die Permafrostböden der Arktis in etwa die doppelte Menge Kohlenstoff speichern wie aktuell in der Atmosphäre vorhanden ist.
- Das Tauen des Permafrostbodens gefährdet außerdem die Stabilität von Städten, Verkehrswegen, Pipelines und Industrieanlagen.

Quellen: IPCC – 2019 ; Nitze et al. - 2018; Turetsky et al. - 2019

Maßnahmen gegen den Klimawandel

Die Menschheit hat nur noch ein begrenztes Kohlenstoffbudget zur Verfügung..........23

Die bisher beschlossenen Emissionsreduzierungen reichen nicht aus..........................24

Sogenannte „Negative Emissionen" können nur einen begrenzten Beitrag leisten 25

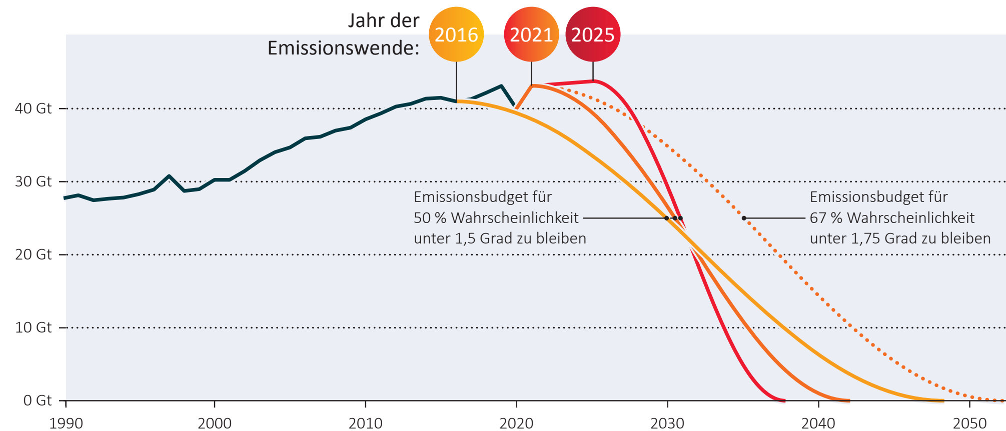
Eine CO_2-Bepreisung wäre ein wirksames Mittel zur Reduzierung der Emissionen.......26

Die bestehenden Kohlenstoffsenken wie Böden, Wälder und Ozean müssen gesichert werden..27

Die internationale Verteilung des verbleibenden Budgets ist eine politisch-ethische Frage..28

Begrenztes Kohlenstoffbudget

CO_2-Emissionen in Milliarden Tonnen (Gt)



Soll der globale Temperaturanstieg auf maximal 2 Grad begrenzt werden, dürfen insgesamt nur noch etwa 1.050 Milliarden Tonnen (Gigatonnen) CO_2 ausgestoßen werden. Für eine Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 Grad beträgt die Gesamtmenge der Emissionen sogar weniger als 300 Gigatonnen CO_2. Je später mit der Reduktion der Emissionen begonnen wird, desto schneller und extremer müssen die Veränderungen später vonstatten gehen.

Daten: IPCC SR15 (2018).

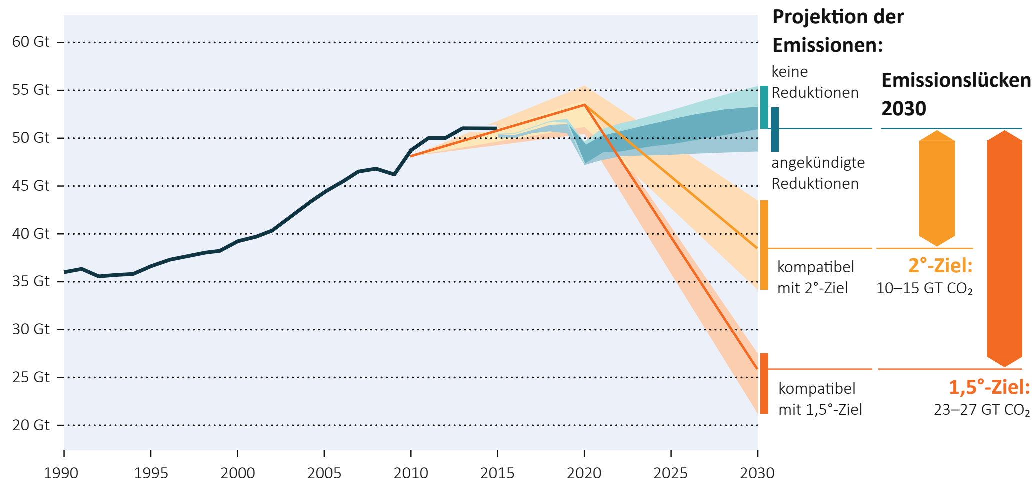
Die Menschheit hat nur noch ein begrenztes Kohlenstoffbudget zur Verfügung

- Mit dem 2015 geschlossenen Pariser Klimaabkommen hat sich die Staatengemeinschaft verpflichtet, die Erderwärmung in einem Bereich zwischen 1,5 °C und deutlich unter 2 °C zu begrenzen.
- Soll der globale Temperaturanstieg auf maximal 2 °C begrenzt werden, dürfen insgesamt – von allen Ländern der Welt zusammen – nur noch etwa 1.050 Milliarden Tonnen (Gigatonnen) CO_2 ausgestoßen werden. Für eine Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 °C beträgt die Gesamtmenge der Emissionen bis zum Jahr 2100 sogar weniger als 300 Gigatonnen CO_2. Das erfordert höchstwahrscheinlich den Einsatz von Technologien, mit denen der Atmosphäre CO_2 wieder entzogen werden kann. Hinsichtlich der Budgetgröße bestehen jedoch viele Unsicherheitsfaktoren, die sich unter anderem aus unterschiedlichen Definitionen des 1,5 °C-Ziels, unterschiedlichen Annahmen über die Klimasensitivität und den Grad der bisherigen Erwärmung sowie der zukünftigen Entwicklung anderer Treibhausgase ergeben.
- Eine Klimastabilisierung entsprechend des Übereinkommens von Paris verlangt eine rasche, nachhaltige und globale Abkehr von den fossilen Energieträgern. Je später man beginnt, die Emissionen zu reduzieren, desto radikaler müssen spätere Klimaschutzmaßnahmen ausfallen, um das globale Emissionsbudget zur Einhaltung des Erwärmungslimits nicht zu überschreiten.

Quellen: Edenhofer & Jakob – 2019; Die CO2-Uhr des MCC: https://www.mcc-berlin.net/forschung/co2-budget.html; IPCC 2018.

2030 müssten die Emissionen deutlich niedriger sein als von den Staaten geplant

Projektionen für CO_2-Emissionen und Emissionslücken in Milliarden Tonnen CO_2 (Gt)



Anhand der Projektionen der Emissionen der Staaten der Welt wird deutlich, dass die vorgesehenen Emissionsreduzierungen noch deutlich zu niedrig sind, um die Ziele des Pariser Abkommens zu erreichen. Um den Klimawandel auf 2° C zu begrenzen, müssten bis 2030 zusätzlich zu den bereits geplanten Reduktionen weitere 10-15 Gigatonnen CO_2 eingespart werden. Um ihn auf 1,5° C zu begrenzen, müssten sogar 23-27 Gigatonnen eingespart werden.

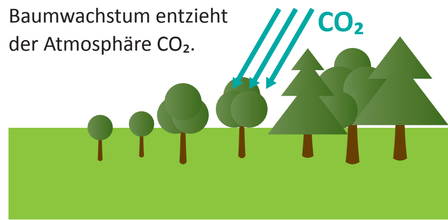
Quelle: Climate Action Tracker (Sept. 2020)

Die bisher beschlossenen Emissionsreduzierungen reichen nicht aus

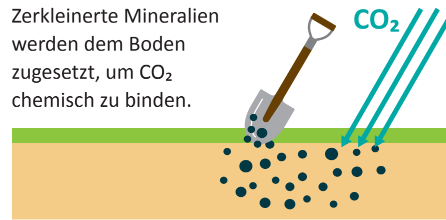
- Um den Beschluss des Pariser Klimaabkommens umzusetzen, die Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen, haben alle Mitgliedsstaaten des Abkommens sogenannte nationally determined contributions (NDCs), also national festgelegte Beiträge, beschlossen. In diesen geben sie an, wie stark sie ihre eigenen Emissionen reduzieren wollen.
- Die so vorgesehenen Reduktionen sollen, so das Ziel des Abkommens, zusammen ausreichen, den Klimawandel wie angestrebt zu begrenzen. Um das sicherzustellen, sieht das Abkommen eine regelmäßige Prüfung der Beiträge der Mitgliedsstaaten vor. Falls diese Prüfung ergibt, dass die Reduktionen nicht ausreichen, werden die Staaten aufgefordert, nachzubessern.
- Tatsächlich sind die von den Ländern vorgesehenen Emissionsreduzierungen auch nach der neuesten Aktualisierungsrunde fünf Jahre nach dem Pariser Abkommen bei weitem nicht ausreichend, um den Klimawandel auf 1,5 °C oder deutlich unter 2 °C zu begrenzen.

Beispiele für Technologien für negative Emissionen

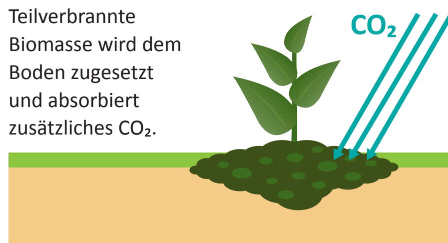
(Wieder-) Aufforstung
Baumwachstum entzieht der Atmosphäre CO_2.



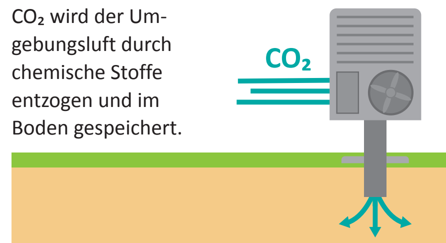
Forcierte Verwitterung
Zerkleinerte Mineralien werden dem Boden zugesetzt, um CO_2 chemisch zu binden.



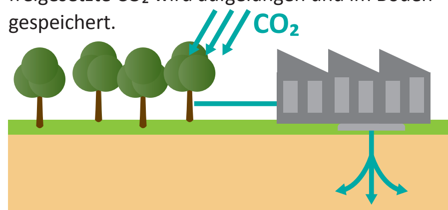
Biokohle
Teilverbrannte Biomasse wird dem Boden zugesetzt und absorbiert zusätzliches CO_2.



Luftfilter
CO_2 wird der Umgebungsluft durch chemische Stoffe entzogen und im Boden gespeichert.



Bioenergie mit CO_2-Abscheidung und -Verpressung
Pflanzen wandeln CO_2 in Biomasse um, die als Energieträger genutzt wird. Das bei der Verbrennung freigesetzte CO_2 wird aufgefangen und im Boden gespeichert.



Ozeandüngung
Eisen oder andere Nährstoffe werden dem Ozean zugesetzt, um die CO_2-Aufnahme zu erhöhen.

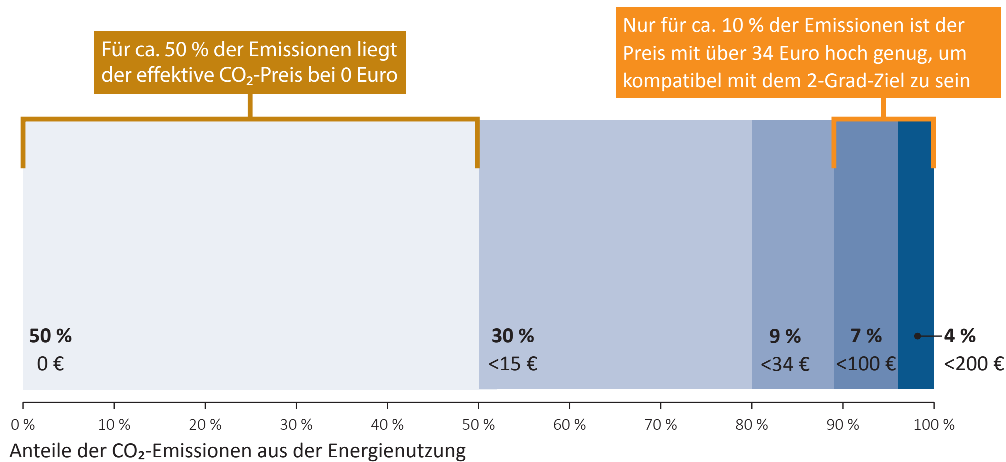


Sogenannte „Negative Emissionen“ können nur einen begrenzten Beitrag leisten

- Mit Blick auf einen angestrebten Temperaturanstieg von maximal 1,5 °C erscheint es wahrscheinlich, dass die Menschheit zunächst mehr CO_2 ausstoßen wird, als sie es für die Begrenzung des Klimawandels eigentlich dürfte.
- Sogenannte negative Emissionen sollen der Atomsphäre wieder CO_2 entziehen. Sie würden es der Welt sozusagen ermöglichen, ihren bereits in Anspruch genommenen „Kredit“ beim CO_2-Budget in der Zukunft zurückzuzahlen.
- Viele der möglichen Technologien für negative Emissionen verursachen aber Zielkonflikte. Eine Aufforstung in großem Maßstab würde z. B. das Land für den Lebensmittelanbau verknappen.
- Viele der für negative Emissionen vorgesehenen Technologien sind nur in kleinen, lokalen Anwendungen erprobt. Es ist unsicher, wieweit diese global und in großem Maßstab eingesetzt werden können.
- Diese CO_2-Speichermöglichkeiten sollten also mit Bedacht in eine Gesamtstrategie zur Begrenzung des Klimawandels eingebunden werden. Die Klimapolitik muss die kurzfristige Emissionsreduktion und einen Umbau der Energiesysteme als Priorität haben.

Quellen: MCC (2016)

Effektiver CO_2-Preis
in Euro pro Tonne CO_2



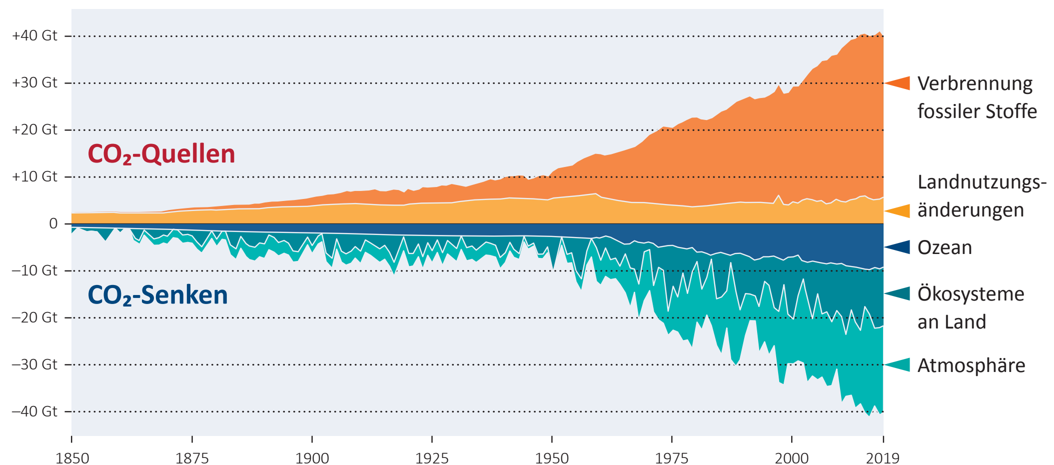
Ein CO_2-Preis gilt als wirksames Mittel, Anreize für die Minimierung von Emissionen zu schaffen. Allerdings funktioniert das nur, wenn dieser Preis hoch genug ist. Für den überwältigenden Teil der Emissionen ist der Preis null oder zu niedrig, um wirkliche Anreize für die Emissionsminderung zu schaffen. Die Daten beziehen sich auf 42 OECD- und G-20-Länder, die für 80 % der globalen Emissionen verantwortlich sind.
nach UNEP Emissions Gap Report (2018)

Eine CO_2-Bepreisung wäre ein wirksames Mittel zur Reduzierung der Emissionen

- Ein CO_2-Preis schafft den Anreiz, Emissionen zu vermeiden, und zwar immer zunächst dort, wo dies am kostengünstigsten möglich ist.
- Für eine erfolgreiche Stabilisierung des Weltklimas sollte ein solcher CO_2-Preis möglichst weltweit in entsprechender Höhe eingeführt werden.
- Für den überwältigenden Teil der Emissionen ist der derzeitige Preis jedoch null oder zu niedrig, um wirkliche Anreize für die Emissionsminderung zu schaffen.
- Für die Umsetzung bietet sich ein Emissionshandelssystem an, bei dem mit Zertifikaten gehandelt wird, die das Recht einräumen, eine begrenzte Menge an CO_2 in der Atmosphäre zu deponieren. Alternativ käme auch eine Steuer auf CO_2-Emissionen in Frage.

Quelle: UNEP – 2018

CO_2-Quellen und Senken 1850–2019
in Milliarden Tonnen CO_2 (Gt)



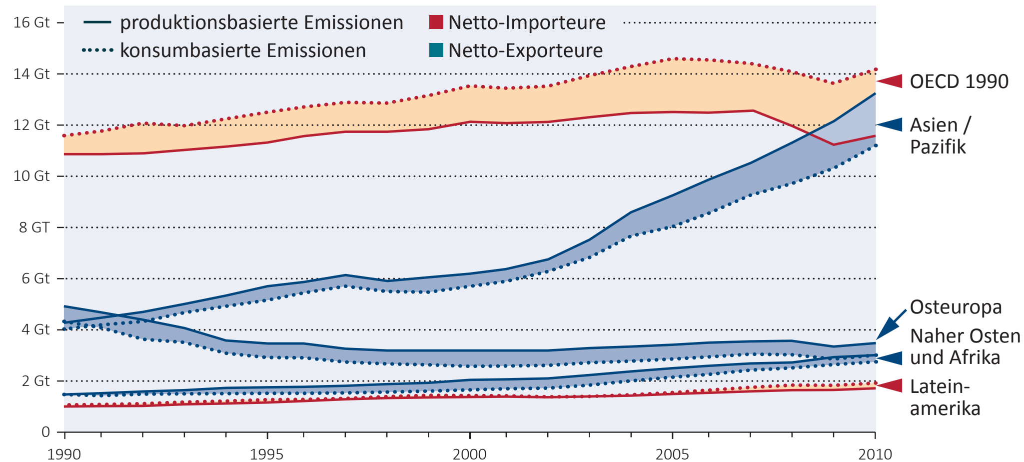
Nur ein Teil des Kohlendioxids verbleibt in der Atmosphäre. Auch der Ozean und Ökosysteme an Land (wie die Wälder) nehmen Kohlenstoffdioxid auf. Ohne diese „Senken" würde der Klimawandel noch stärker ausfallen. Bei einem kleinen Teil der Emissionen – ca. 4 % – ist unklar, wo diese verbleiben. Dies erklärt die in der Grafik sichtbare Abweichung zwischen Quellen und Senken. *Quelle: Global Carbon Budget (2020)*

Die bestehenden Kohlenstoffsenken wie Böden, Wälder und Ozean müssen gesichert werden

- In den letzten Jahrzehnten haben Böden, Wälder und der Ozean etwa die Hälfte der von Menschen verursachten CO_2-Emissionen aufgenommen.
- Es ist unsicher, wie lange Böden und Wälder noch weiter CO_2 aufnehmen können. Es ist möglich, dass sich ab ca. 2050 der Effekt umkehrt und sie weiteres CO_2 ausstoßen, statt es aufzunehmen, so dass sich die Erderwärmung noch verstärkt.
- Die Fähigkeit dieser Senken, Kohlenstoff aufzunehmen, muss gesichert werden. Bei intensiver Nutzung verlieren Wälder und Böden jedoch ihre Speicherfunktion.
- In Deutschland spielen Moorböden beim Klimaschutz eine wichtige Rolle. Landwirtschaftlich genutztes Grünland befindet sich oft auf ehemaligen Mooren. Solches Grünland macht 7 % der landwirtschaftlichen Fläche aus, verursacht jedoch 35 % der Klima-Emissionen der Landwirtschaft. Um die Senkenfunktion der Moore wiederherzustellen, ist eine weitgehende Wiedervernässung notwendig.

Quelle: Thünen-Institut – 2011; WBAE – 2016; Global Carbon Project — 2020

Jährliche CO_2-Emissionen nach Regionen
in Milliarden Tonnen (Gt)



In vielen Ländern, z. B. in Asien, sind die Emissionen in den letzten Jahren stark angestiegen. Allerdings werden dort auch Produkte hergestellt, die oft in westlichen Ländern konsumiert werden. Die Emissionen, die auf die Produktion von Gütern entfallen, die in einem Land produziert werden, aber in einem anderen Land konsumiert werden, werfen Fragen nach der Verteilungsgerechtigkeit des verbleibenden CO_2-Budgets auf. *Quelle: Edenhofer & Jakob (2019)*

Die internationale Verteilung des verbleibenden Budgets ist eine politisch-ethische Frage

- Die durchgezogene Linie in der Grafik bemisst den CO_2-Ausstoß, der durch die Produktion von Gütern verursacht wurde – die gestrichelte Linie beschreibt die CO_2-Bilanz der in der jeweiligen Region konsumierten Produkte. Die wachsende Bedeutung der Import/Export-Bilanz kann ermessen, wer sich vor Augen führt, dass ein Viertel des globalen CO_2-Ausstoßes auf international gehandelte Produkte entfallen.
- Während die Industrieländer schon seit langer Zeit hohe CO_2-Emissionen verursachen, haben die Emissionen in Asien in den letzten Jahren dramatisch zugenommen.
- Die beobachteten Exportüberschüsse oder -defizite bei den Emissionen haben eine Vielzahl von Gründen: unterschiedliche Techniken bei der Energieerzeugung, unausgeglichene Handelsbilanzen oder Spezialisierung auf den Export besonders emissionsintensiver Produkte.
- Die Emissionen, die auf die Produktion von Gütern entfallen, die in einem Land produziert werden, aber in einem anderen Land konsumiert werden, werfen Fragen nach der Verteilungsgerechtigkeit des verbleibenden CO_2-Budgets auf.
- Die Lastenverteilung des Klimaschutzes ist eine wichtige politische und ethische Frage, die jedoch nicht allein mit dem Hinweis auf konsum- oder produktionsbasierte Emissionen entschieden werden kann.
- Im Hinblick auf die Ziele des Pariser Klimaabkommens und die Notwendigkeit einer Dekarbonisierung im Weltmaßstab bis zur Mitte des Jahrhunderts sind Industrieländer wie Deutschland in besonderem Maße gefordert: Angesichts überproportional hoher Emissionen muss der Transformationsprozess schneller vorangetrieben werden mit dem Ziel, Kohlenstoffneutralität noch deutlich früher zu erreichen als im Jahr 2050.

Quellen: IPCC – 2014; Edenhofer & Jakob – 2019.

Dieses Klimadossier wurde erstellt unter der Mitarbeit von:

Prof. Dr. Antje Boetius, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven

Prof. Dr. Ottmar Edenhofer, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Prof. Dr. Sabine Gabrysch, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung & Charité – Universitätsmedizin Berlin

Prof. Dr. Nicolas Gruber, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Prof. Dr. Gerald Haug, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina

Prof. Dr. Daniel Klingenfeld, Umweltbundesamt, Dessau

Prof. Dr. Stefan Rahmstorf, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Prof. Dr. Markus Reichstein, Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena

Prof. Dr. Thomas Stocker, Universität Bern

Prof. Dr. Ricarda Winkelmann, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Literatur

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft – 2020. Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2019. Berlin.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft – 2021. Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2020. Berlin.

Bova, S. et al. – 2021. Seasonal origin of the thermal maxima at the Holocene and the last interglacial. Nature 589: 548-553.

Caesar, L. et al. - 2018. Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation. Nature 556: 191-196.

CBD – o. J. Convention on Biological Diversity. Forest Biodiversity and climate change. Montreal.

Chakraborty, S. & Newton, A. C. – 2011. Climate change, plant diseases and food security: an overview. Plant Pathology 60: 2–14. DOI: 10.1111/j.1365-3059.2010.02411.x

Climate Action Tracker - o.J. https://climateactiontracker.org/global/cat-emissions-gaps/

Dangendorf, S. et al. – 2019. Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s. Nature Climate Change 9: 705–710. DOI: 10.1038/s41558-019-0531-8

DWD - o.J. Deutscher Wetterdienst. https://www.dwd.de/DE/Home/home_node.html

Edenhofer, O. & Jakob, M. – 2019. Klimapolitik. Ziele, Konflikte, Lösungen. C.H.Beck, 2. aktualisierte und erweiterte Auflage.

Elliot J. et al – 2014. Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural roduction under climate change. PNAS 111: 3239–3244. DOI: 10.1073/pnas.1222474110.

EU JRC ASAP – o.J. Anomaly Hotspots of Agricultural Production. European Commission Joint Research Center. https://mars.jrc.ec.europa.eu/asap/

FAO - 2018. http://www.fao.org/climate-change/en/

Global Carbon Project – 2020. Carbon budget and trends 2020. DOI: 10.5194/essd-12-3269-2020

Grace, D. et al. – 2015. Climate and livestock disease: assessing the vulnerability of agricultural systems to livestock pests under climate change scenarios. CCAFS Working Paper no. 116. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS), Copenhagen.

Haines, A. & Ebi, K. – 2019. New England Journal of Medicine 380: 263-273. DOI: 10.1056/NEJMra1807873.

Heron, S. F.et al. – 2016. Warming Trends and Bleaching Stress of the World's Coral Reefs 1985-2012. Scientific Reports 6: 38402. DOI: 10.1038/srep38402.

Hughes et al. – 2020. Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene. Science 359, 80–83. DOI: 10.1126/science.aan8048.

IPBES – 2019. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services – 2019. Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES secretariat, Bonn. https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579

IPCC – 2014. Intergovernmental Panel on Climate Change: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Verfügbar unter: https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3. Aufgerufen am 16.04.2021.

IPCC – 2018. Intergovernmental Panel on Climate Change. Global Warming of 1.5°C. Verfügbar unter: https://www.ipcc.ch/sr15/.

IPCC – 2019. Intergovernmental Panel on Climate Change – Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.

Jones et al - 2004. Coral decline threatens fish biodiversity in marine reserves. PNAS 101: 8251– 8253.

Keeling C.D. et al. - o.J. Exchanges of atmospheric CO2 and 13CO2 with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000. I. Global aspects, SIO Reference Series, No. 01-06, Scripps Institution of Oceanography, San Diego, 88 pages, 2001. http://escholarship.org/uc/item/09v319r9

Lehmann, J. et al. – 2015. Increased record-breaking precipitation events under global warming. Climatic Change 132, 501-515. DOI: 10.1007/s10584-015-1434-y.

Lenton, T. M. et al. – 2019. Climate tipping points — too risky to bet against. Nature: 575, 592-595. DOI: 10.1038/d41586-019-03595-0.

Loeb et al. – 2009. Toward optimal closure of the Earth's top-of-atmosphere radiation budget. Journal of Climate,22, 748–766

Lüthi et al. – 2008. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. Nature 453: 379–382.

Marcott et al. – 2013. A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years. Science 339 (issue 6124): 1198-1201.

MCC (2016): MCC-Kurzdossier „Negative Emissionen" https://www.mcc-berlin.net/forschung/kurzdossiers/negativeemissionen.html

NASA – 2021. https://www.nasa.gov/feature/esnt/2021/earth-s-cryosphere-is-vital-for-everyone-here-s-how-nasa-keeps-track-of-its-changes

NASA GISTEMP - o.J. https://data.giss.nasa.gov/gistemp/

NASA Goddard Institute for Space Studies GISTEMP. https://data.giss.nasa.gov/gistemp/

Nitze et al. – 2018. Remote sensing quantifies widespread abundance of permafrost region disturbances across the Arctic and Subarctic, Nature Communications, 9(1): 5423. https://doi.org/10.1038/s41467-018-07663-3

NOOA (Global Monitoring Laboratory). https://www.esrl.noaa.gov/gmd/

NSIDC – 2021. https://nsidc.org/

Pritchard – 2019 Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress. Nature 569, 649–654.

Robine et al. – 2008. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. Comptes Rendus Biologies 331: 171-178.

Rosenzweig et al. – 2014. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. PNAS 11: 3268–3273.

Scripps Institution. https://scrippsco2.ucsd.edu/

Shakun et al. – 2012. Global warming preceded by increasing carbon dioxide concentrations during the last deglaciation. Nature 484: 49–54.

Shepherd et al. – 2019. Mass balance of the Greenland Ice Sheet from 1992 to 2018. Nature 579: 233-238.

Slater et al. – 2021. Review article: Earth's ice imbalance, The Cryosphere, 15, 233–246, https://doi.org/10.5194/tc-15-233-2021, 2021.

Spehn & Körner – 2017. Auswirkungen des Klimawandels auf die Natur in den Alpen. Natur und Landschaft: 92: 407-411.

Steffen et al. – 2019. Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. PNAS 115: 8252–8259

Thünen-Institut – 2011. Klima Hotspot Moorböden. Forschungsreport Nr. 2. Braunschweig.

Trenberth et al. – 2009. Earth's global energy budget. Bulletin of the American Meteorological Society: https://doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1

Turetsky et al. – 2019. Permafrost collapse is accelerating carbon release. Nature, 569: 32-34. doi: 10.1038/d41586-019-01313-4.

UN – 2018. Emissions Gap Report 2018. United Nations Environment Programme, Nairobi.

UN – 2020. Emissions Gap Report 2020. United Nations Environment Programme, Nairobi.

UNFCCC – 2021. NDC Synthesis Report. UNFCCC, Bonn. https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs/nationally-determined-contributions-ndcs/ndc-synthesis-report#eq-5

Wild et al. – 2015. The energy balance over land and oceans: an assessment based on direct observations and CMIP5 climate models. Climate Dynamics 44: 3393-3429.

Watts et al. – 2020. The 2020 report of The Lancet Countdown on health and climate change: responding to converging crises. The Lancet: 10269, 129-170.

WBAE – 2016 Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlicher Verbraucherschutz und Wissenschaftlicher Beirat Waldpolitik beim BMEL (2016) Klimaschutz in der Land- und Forstwirtschaft sowie den nachgelagerten Bereichen Ernährung und Holzverwendung. Gutachten. Berlin

Willeit et al. – 2019.Mid-Pleistocene transition in glacial cycles explained by declining CO2 and regolith removal. Sciences Advances 5: 7337.

World Disaster Report – 2020. International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies. World Disaster Report. Genf. Verfügbar unter: https://media.ifrc.org/ifrc/world-disaster-report-2020/

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V.
– Nationale Akademie der Wissenschaften –

Jägerberg 1
06108 Halle (Saale)
Tel.: (0345) 472 39-600
Fax: (0345) 472 39-919
E-Mail: leopoldina@leopoldina.org

Berliner Büros:

Reinhardtstraße 14
10117 Berlin

Unter den Linden 42
10117 Berlin

Die 1652 gegründete Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina ist mit ihren rund 1.600 Mitgliedern aus nahezu allen Wissenschaftsbereichen eine klassische Gelehrtengesellschaft. Sie wurde 2008 zur Nationalen Akademie der Wissenschaften Deutschlands ernannt. In dieser Funktion hat sie zwei besondere Aufgaben: die Vertretung der deutschen Wissenschaft im Ausland sowie die Beratung von Politik und Öffentlichkeit.

Die Leopoldina tritt für die Freiheit und Wertschätzung der Wissenschaft ein. Sie trägt zu einer wissenschaftlich aufgeklärten Gesellschaft und einer verantwortungsvollen Anwendung wissenschaftlicher Erkenntnisse zum Wohle von Mensch und Natur bei. Im interdisziplinären Diskurs überschreitet sie thematische, fachliche, politische und kulturelle Grenzen. Die Leopoldina setzt sich für die Achtung der Menschenrechte ein.

Als Nationale Akademie der Wissenschaften setzt die Leopoldina im Austausch mit anderen Institutionen, auch auf internationaler Ebene, Themen in der wissenschaftlichen Kommunikation und Politikberatung. In ihrer Politik beratenden Funktion legt die Leopoldina fachkompetent, unabhängig, transparent und vorausschauend Empfehlungen zu gesellschaftlich relevanten Themen vor. Sie begleitet diesen Prozess mit einer kontinuierlichen Reflexion über Voraussetzungen, Normen und Folgen wissenschaftlichen Handelns.

www.leopoldina.org